

佐藤 吉孝^{*1}, 山本 貴士^{*2}, 服部 篤史^{*1}, 宮川 豊章^{*3}

Shear Behavior of RC Member Deteriorated by Corrosion of Reinforcements

Yoshitaka SATOH^{*1}, Takashi YAMAMOTO^{*2}, Atsushi HATTORI^{*3} and Toyoaki MIYAGAWA^{*4}

要旨 : 本研究では, 鉄筋腐食が RC 部材のせん断耐荷特性に与える影響を明らかにすることを目的として, せん断補強筋の腐食に着目し, 電食によりせん断補強筋に対してモデル化した腐食を生じさせた RC はりの曲げ載荷試験をもとにせん断耐荷性状を検討した. また, せん断補強筋の腐食を, 引張性能の低下および付着性能の低下としてモデル化した有限要素解析による検討を行った. これらの結果をもとに, 斜め引張破壊が生じる場合における, せん断補強筋の腐食の生じた RC 部材のせん断耐力の算定手法を提案した.

キーワード : せん断耐荷性能, 鉄筋腐食, せん断補強筋, 付着性能, RC 部材

1. はじめに

近年, 鉄筋腐食による RC 構造物の性能低下が問題となってきており, 腐食の進行程度によっては耐荷性能の低下が懸念される. 鉄筋腐食が RC 部材の曲げ耐荷性能に与える影響については比較的検討例は多くなってきているものの, せん断耐荷性能に与える影響については, 検討事例¹⁾²⁾が少ないのが現状である.

そこで本研究では, 電食によりせん断補強筋に腐食を生じさせた RC はりの曲げ載荷試験, およびせん断補強筋の引張性能と付着性能の低下をモデル化した有限要素解析を行うことで, せん断補強筋の腐食が生じた RC 部材のせん断耐荷特性を明らかにすることを目的とした.

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の形状・寸法を図-1 に示す. 供試体は, 引張側 4-D16(SD295A)の単鉄筋 RC はりとした.

せん断補強筋には, 135° フック付きの D6 スターラップ(SD295A)を用いた. コンクリートの目標配合強度は $f_{cr}=30 \text{ N/mm}^2$ とし, NaCl 5.00 kg/m³ を外割り添加した.

一方, せん断補強筋比は, 斜めひび割れとせん断補強筋の腐食の関係を主として検討することから, せん断耐力比 V_{yd}/V_{mu} (V_{yd} : 設計せん断耐力, V_{mu} : 部材が設計曲げ耐力に達するときのせん断力)を参考に決定し, 斜め引張破壊の生じる可能性がある $V_{yd}/V_{mu}=0.83 (<1)$ とした. このとき, せん断補強筋比は $p_w=0.20\%$ ($s_s=160\text{mm}$, s_s : せん断補強筋間隔)となる. 耐力比の算定には, 曲げ耐力は断面分割法を用い, せん断耐力は 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]³⁾の耐力式を部材係数 $\gamma_B=1$ で用いた.

せん断補強筋には, 電食法により腐食を生じさせた. 図-1 中の○印で示したスターラップを電食対象とし, これ以外のスターラップおよび主筋にはエポキシ樹脂の塗布により防錆処理を

*1 大成建設(株)

*2 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 助手

*3 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 助教授

*3 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授

施した。なお、電食によって鉄筋腐食劣化を表現する手法には、腐食メカニズムや腐食形態の点で議論がある。しかし、今回はまず、ある腐食ひび割れ幅をともなった腐食量の下でのせん断耐荷挙動を明らかにするために、比較的早期に所定の腐食量を達成でき、かつ腐食部位や量を通電対象の場所、期間によって容易に調整できる電食法を用いることとした。

2.2 実験要因

実験要因は、健全を含めた3水準の電食によるせん断補強筋の腐食量とし、指標として質量減少率を用いた。

電食では、供試体を3%のNaCl溶液入り水槽に浸漬し、せん断補強筋(アノード)と供試体側面に設置した銅板(カソード)で回路を形成し、腐食電流密度 $0.1\text{mA}/\text{cm}^2$ となる電流を通電した。

質量減少率は、曲げ載荷試験終了後の供試体からはつり出したスターラップを対象に、クエン酸水素二アンモニウム溶液での錆除去による質量減少を測定することにより算出した。

腐食段階1は、本実験の供試体(せん断補強筋かぶり 8.4mm)で、腐食ひび割れが拡大する加速期後期を想定し、質量減少率 5.90% (平均腐食ひび割れ幅 0.20mm 、せん断補強筋断面直径減少量 0.15mm :質量減少率が断面減少率に等しいと仮定して算出)、腐食段階2は、劣化期を想定し、質量減少率 11.90% (ひび割れ幅 0.25mm 、断面直径減少量 0.22mm)となった。以下、腐食段階1を腐食小、段階2を腐食大とする。

2.3 載荷方法および測定項目

載荷は、対称2点一方向単調載荷曲げ試験とした。載荷点および支点位置を図-1に示す。せん断スパン有効高さ比は $a/d=3.11$ とした。

荷重、スパン中央変位および両支点変位(支点変位量の補正用)を測定した。また、せん断スパン内のスターラップに貼付したひずみゲージによりひずみを測定した。

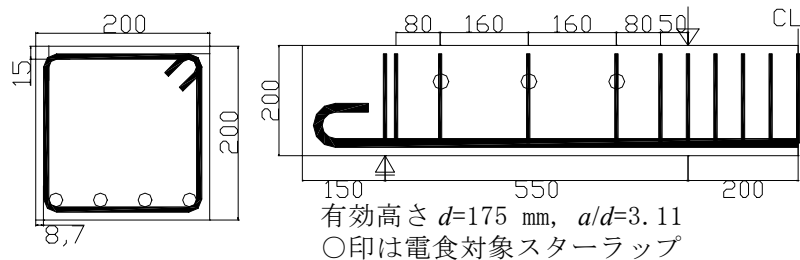


図-1 供試体の形状・寸法

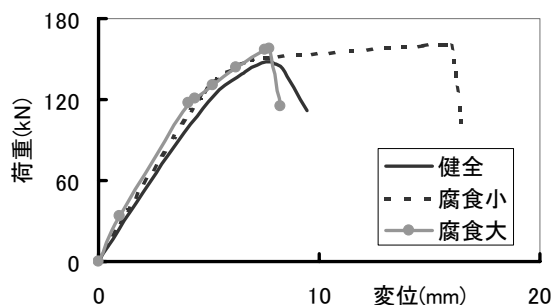


図-2 荷重-変位曲線

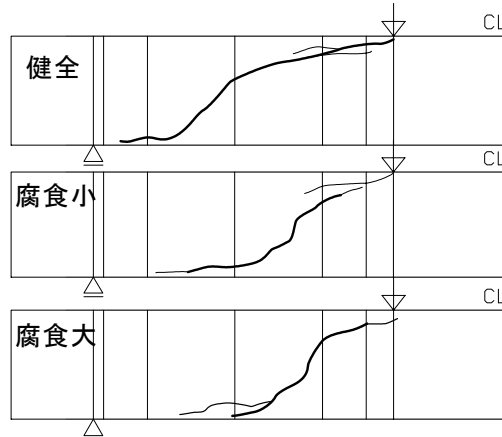


図-3 荷重低下時のひび割れ状況

3. 曲げ載荷試験結果および考察

荷重-変位曲線の包絡線を図-2に、荷重低下時のひび割れ状況を図-3に示す。

電食後の供試体には、スターラップに沿った腐食ひび割れは確認できたが、防錆処理を施した主筋に沿ったものはみられなかった。また、載荷後の供試体からはつり出したスターラップの観察からは、斜めひび割れで大きく伸ばされた影響で詳細な測定は出来ていないものの、目視で所々局所的に断面が欠損しているものが見られた。なお、主筋の腐食は認められなかった。

いずれの供試体も斜め引張破壊を生じたが、腐食供試体では斜めひび割れの位置が載荷点寄りに変化した。腐食にともなうせん断補強筋の

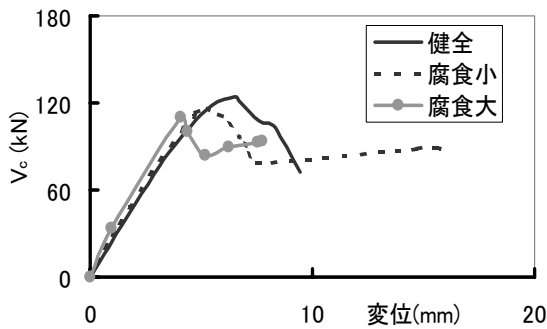


図-4 コンクリート負担せん断力 V_c -変位曲線

付着低下により，せん断補強筋の定着部，すなわち主筋とせん断補強筋の接点に大きな応力が作用し，斜めひび割れの起点が変化した可能性がある．結果として，腐食供試体では，斜めひび割れがせん断補強筋量の多い，荷重点から $0.7d$ 付近(有効高さ $d=175\text{mm}$ ， $s_s=80\text{mm}$ ， $p_w=0.40\%$)に発生し，健全供試体のせん断補強筋負担せん断力(以下， V_s と表記)よりも大きくなったことから最大荷重が大きくなったと考えられる．

そこで，健全では $s_s=160\text{mm}$ ，腐食では $s_s=80\text{mm}$ としてせん断補強筋の実験ひずみよりトラス理論を用いて V_s ($\gamma_m=\gamma_b=1$) を算定³⁾した．この算定値と全荷重との差から求めたコンクリート負担せん断力(以下， V_c と表記)の挙動を図-4に示す．なお，いずれの供試体においても斜めひび割れと交差したせん断補強筋は降伏に至った．

腐食供試体では健全よりも変位の小さい段階で V_c の低下が生じている．既往の成果²⁾では，変位の小さい段階から斜めひび割れ幅が拡大している様子が測定されていることから，腐食によるせん断補強筋の付着性能低下により，せん断補強筋のひび割れ抑制効果が低下したことが V_c の低下の一因である可能性がある．なお，腐食小の変形性能が他よりも大きくなった．既存の研究結果⁴⁾に示されているように，せん断補強筋の腐食にともなう垂直方向の腐食ひび割れの存在により，斜めひび割れの進展が遅れることで変形性能が持続した可能性が考えられるが，荷重時の状況からは確認できておらず詳しい原因については不明である．

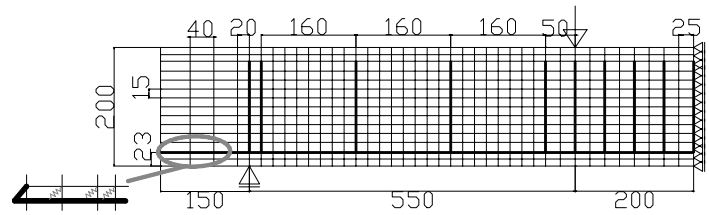


図-5 解析モデル

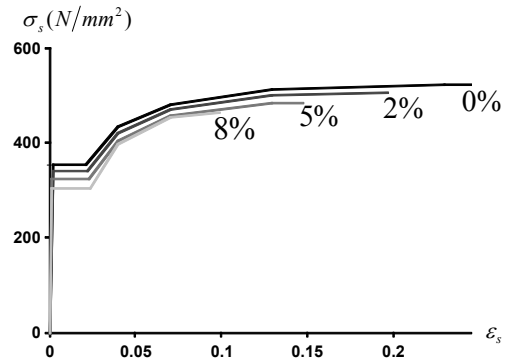


図-6 腐食鉄筋の応力-ひずみ関係⁸⁾

4. 有限要素解析結果および考察

実験結果で得られた現象を踏まえて，有限要素解析ではせん断補強筋の引張性能の低下および付着性能の低下をモデル化し，これらがせん断耐荷挙動に与える影響を検討した．

4.1 有限要素解析概要

解析には，汎用有限要素解析コード ABAQUS /STANDARD Ver6.3 を用いた．

(1) 解析モデル

解析モデルを図-5に示す．供試体の対称性を考慮し，片側のみについてモデル化した．スパン中央断面をはり軸方向に，支点を鉛直方向に拘束した．すべての鉄筋-コンクリート間の付着をバネ要素で表現したが，主筋の定着部(供試体端部)のみは節点を剛結した．コンクリートには2次元1次の四辺形要素，主筋およびスターラップには1次のトラス要素を用いた．

(2) 材料構成則および鉄筋腐食のモデル化

コンクリート圧縮側の応力-ひずみ関係には，修正 Kent&Park⁵⁾モデル，引張側には CEB モデル⁶⁾を用いた．せん断補強筋を含む鉄筋の応力-ひずみ関係には Thompson モデル⁷⁾を用いた．腐食によるせん断補強筋の引張性能の低下は，このモデルをもとにした服部らの腐食鉄筋モデル⁸⁾

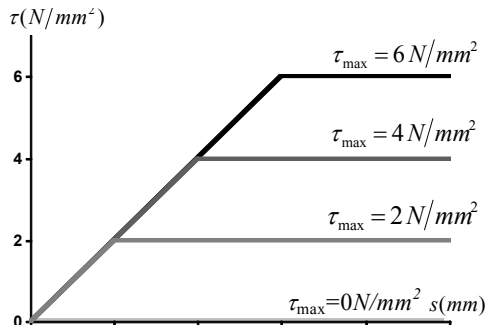


図-7 腐食鉄筋の付着応力-すべり関係

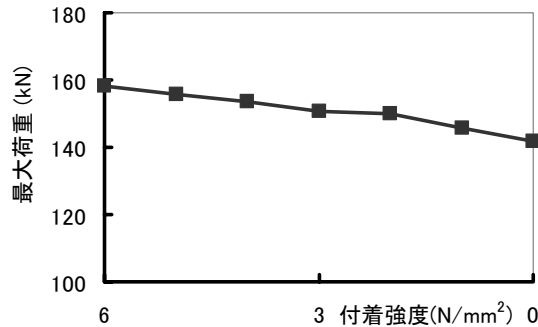


図-9 付着性能低下が最大荷重に与える影響

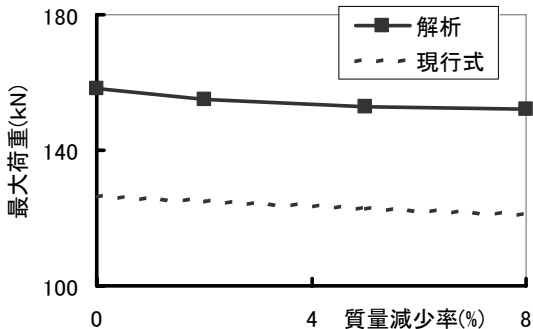


図-8 引張性能低下が最大荷重に与える影響

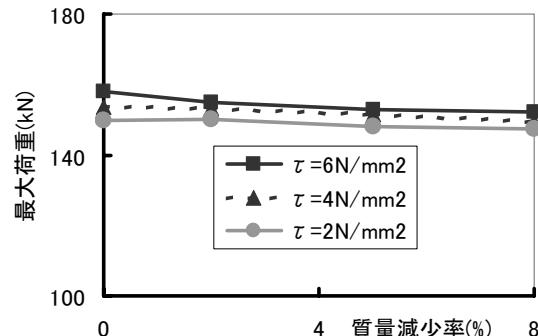


図-10 引張性能および付着性能の低下が最大荷重に与える影響

で表現した。腐食鉄筋(質量減少率 0~8%)の応力-ひずみ関係を図-6 に示す。

鉄筋-コンクリート間の付着応力-すべり関係は、図-7に示すように、最大付着応力以前では線形関係とし、以降は一定値とした。腐食による付着性能の低下は、付着剛性を一定としたままで最大付着強度を 6.00 (健全)⁹⁾~ 0.00N/mm^2 の範囲内で任意に変化させることで表現した。

4.2 有限要素解析結果

腐食によるせん断補強筋の引張性能の低下が最大荷重に与える影響(付着性能は健全を仮定)を図-8に示す。図中に、コンクリート標準示方書³⁾のせん断耐力算定式のせん断補強筋総断面積 A_w と降伏点 f_{wy} に腐食による断面減少および降伏点低下を考慮した値を代入して得られた計算値をあわせて示す。また、腐食によるせん断補強筋の付着性能低下が最大荷重に与える影響(引張性能は健全を仮定)を図-9に示す。

いずれの要因においても耐力が低下した。引張性能の低下を考慮した解析結果の耐力低下の割合は、コンクリート標準示方書の式に腐食の影響を考慮した計算値の低下割合とほぼ等しくなった。また、付着性能低下を考慮したもので

は、部材変形の小さい段階からの斜めひび割れの拡大によって V_c が低下した可能性があるかと推察した実験結果と同様の傾向を示した。なお、実験結果と同様に、いずれの付着強度においても終局時にはせん断補強筋が降伏した。

さらに、引張性能低下および付着性能低下の2つの要因をあわせた解析の結果を図-10に示す。引張性能の低下による V_s の低下と付着性能の低下による V_c の低下が累加的に生じてせん断耐力が低下する結果となった。

5. せん断補強筋の腐食が生じた RC 部材のせん断耐力の評価

実験および解析の結果から、せん断補強筋の腐食が生じたRC部材のせん断耐力の評価に、せん断補強筋の引張性能の低下による V_s の低下、およびせん断補強筋の付着性能の低下による V_c 低下の影響を考慮することを考えた。

まず、せん断補強筋の腐食が生じたRC部材のせん断補強筋負担せん断力 $V_{s(corr)}$ は、図-8の検討結果から、斜めひび割れの発生によってせん断補強筋が降伏する状況において、コンクリー

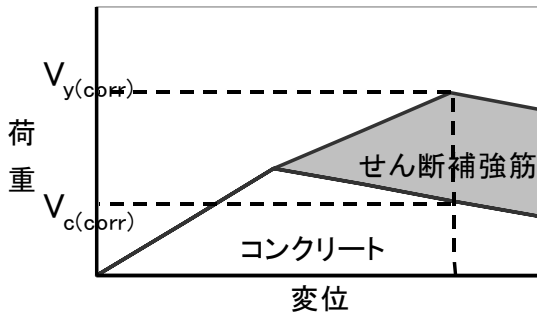


図-11 付着性能低下による V_c 低下の概念

ト標準示方書の V_s 式にせん断補強筋の断面減少および降伏点の低下を考慮した式(1)で表した。

$$V_{s(corr)} = A_{w(corr)} f_{wy(corr)} (\sin \alpha + \cos \alpha) z / s_s \quad (1)$$

ここで、 $A_{w(corr)}$:せん断補強筋の配置間隔 s_s における腐食したせん断補強筋の総断面積、 $f_{wy(corr)}$:腐食したせん断補強筋の降伏強度

一方、 V_c の低下については図-11に示す概念図のように考えた。縦軸は、全せん断抵抗力 $V_{y(corr)}$ のうち $V_{c(corr)}$ はコンクリートが、残りはせん断補強筋が負担するせん断力であることを表している。コンクリート標準示方書の式ではせん断補強筋の降伏で斜めひび割れ幅の拡大が生じて最大耐力に至るとしている。しかし、せん断補強筋とコンクリートのすべりが生じた場合、斜めひび割れ発生後からせん断補強筋の降伏までの変形段階(せん断補強筋負担せん断力が斜めひび割れ幅の拡大とともに増加していく段階)において、せん断補強筋の伸びに加えてすべりによって斜めひび割れ幅が拡大し、骨材のかみ合わせ効果による負担が低下すると推察した。結果として、せん断補強筋降伏時の全せん断抵抗力 $V_{y(corr)}$ (最大荷重時)に占める $V_{c(corr)}$ の割合が小さくなっているとして考慮することとした。

$V_{c(corr)}$ の低下を考慮するにあたって、解析結果を利用した。まず健全($\tau=6 \text{ N/mm}^2$)の解析結果の最大荷重(図-9のy切片)から、図-2のメッシュ分割で健全のせん断補強筋無($p_w=0.00\%$)としたものから得られた最大荷重(= V_c とする)を引いて V_s とし、この V_s と図-9の各付着段階の最大荷重

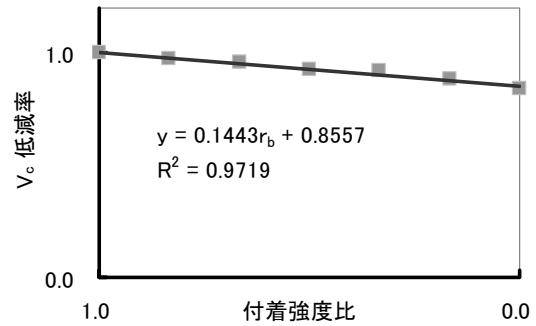


図-12 V_c の低下と付着強度比の関係

の差から V_c -付着強度関係を求めた。両軸ともにそれぞれの健全時の値で除すことで無次元化して整理した結果を図-12に示す。この傾きを V_c の低減係数 α_b として式(2)のように表した。

$$\alpha_b = 0.1443r_b + 0.8557 \quad (2)$$

ここで、 r_b :付着強度比(式(3)¹⁰⁾より算出)

$$r_b = e^{-1.2220 \times \text{腐食ひび割れ幅(mm)}} \quad (3)$$

この低減係数を用いて、せん断補強筋の腐食が生じたRC部材のコンクリート負担せん断力 $V_{c(corr)}$ を次式(4)で表した。

$$V_{c(corr)} = \alpha_b \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vc} \cdot b_w \cdot d \quad (4)$$

以上から、せん断補強筋の腐食が生じたRC部材のせん断耐力 $V_{y(corr)}$ を、式(1)と式(4)の和で表される次式(5)で表した。

$$V_{y(corr)} = V_{c(corr)} + V_{s(corr)} \quad (5)$$

式(5)による算定値と本実験の最大荷重を比較したものを図-13に示す。なお、算定においては3.で考察したように、健全と腐食で斜めひび割れ発生位置が異なり、これに抵抗するせん断補強筋の量が異なったことから、これに応じたせん断補強筋配置間隔 s_s を用いてそれぞれ算出した。 $V_{s(corr)}$ にせん断補強筋の断面減少および降伏点の低下を考慮し、 $V_{c(corr)}$ にせん断補強筋の付着性能の低下を仮定した解析結果を利用した提案式による算定値は、おおむね実験結果の傾向を捉えている。このことから、斜めひび割れによりトラス耐荷機構が形成され、せん断補強筋の降伏が生じて終局に至るものを適用範

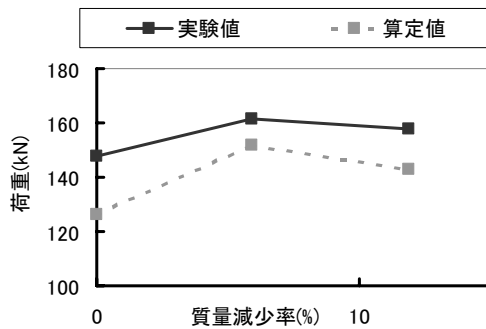


図-13 実験値と算定値の比較

困とした場合、鉄筋腐食の生じた RC 部材のせん断耐力を安全側に評価できると考えられる。

しかし、せん断補強筋の腐食状況によっては、トラス耐荷機構を形成する斜めひび割れが発生せず²⁾、また主筋の腐食が複合する状況では、アーチ耐荷機構が形成され最大荷重が増加する¹⁾などの報告がある。このような場合の耐荷性能の定量化は今後の課題であると考えられる。

6. 結論

以下に、本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめて結論とする。

- (1) 電食によりせん断補強筋に腐食を生じさせた RC はり供試体の曲げ載荷試験から、斜め引張破壊を生じる状況においては、せん断補強筋の断面減少および降伏点の低下によって、せん断補強筋負担せん断力 V_c が低下するとともに、せん断補強筋の付着性能の低下によって、せん断補強筋の役割のうち、せん断ひび割れ幅の拡大を抑制する効果が低下することで、コンクリート負担せん断力 V_c が低下すると考えられる。
- (2) せん断補強筋の引張性能の低下と付着性能の低下を考慮した有限要素解析の結果は、実験結果で得られたせん断耐力の低下挙動と同様の傾向を示した。
- (3) せん断補強筋が腐食した RC はりで斜め引張破壊が生じる場合において、せん断補強筋の引張性能および付着性能の低下が耐力低下に影響を与えていると仮定したせん断耐力の算定手法を提案し、算定値がおおむね実験結果の傾向を捉えていることがわかった。

参考文献

- 1) 橋本航, 森川英典, 小林秀恵: 鉄筋腐食を考慮した RC はり部材のせん断耐荷性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, 2003. 7
- 2) 佐藤吉孝, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: せん断補強筋および主筋の腐食が RC 部材のせん断耐荷特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 821-826, 2003. 7
- 3) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], pp. 67-69, 2002. 3
- 4) 松尾豊史, 酒井理哉, 松村卓郎, 金津努: 鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol. 15, No. 2, pp. 69-77, 2004. 5
- 5) Park, R., Priestley, M. J. N. and Gill, W. D.: Ductility of Square-Confined Concrete Columns, J. Struct. Div., ASCE, Vol. 108, No. ST4, pp. 929-950, 1980
- 6) Comit  Euro-International Du Beton: CEB-FIP MODEL CODE 1990, 2-Material Properties, 1991
- 7) Thompson, K. J. and Park, R.: Ductility of Prestressed and Partially Prestressed Concrete Beams' Sections, PCI Journal March-April, pp. 46-77, 1980
- 8) Atsushi Hattori, Toyooki Miyagawa: Prediction of Degradation and Performance in RC Beams Subjected to Chloride Attack by Corrosion Monitoring, Proc. of 7th International Conference on Inspection, Appraisal, Repair & Maintenance of Buildings & Structures, Vol. 2, pp. 81-88, 2001. 9.
- 9) 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文: 鉄筋腐食が鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No. 50, pp. 534-539, 1996
- 10) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, pp. 47-51, 1998. 10